DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.11.019

基于产教融合和绿色环保的现代精铸技术发展

葛盈华[1],杨春帆[2],王伟春[3]

(1.宁波开发区安德鲁精铸有限公司,浙江 宁波 315803;2.浙江省铸造行业协会,浙江 杭州 310009;3.浙江机电职业技术学院,浙江 杭州 310053)

摘　要:依托浙江省铸造行业协会支持和产教融合基地建设,推动数值模拟、3D 打印等新技术在精铸领域的应用,以有效缩短产品开发周期、提高工艺可靠性。在企业发展过程中同时注重节能减排、绿色环保的理念,克服传统精密铸造的缺点。并对人工智能及信息化管理技术在精铸领域的应用前景作了展望。

关键词:精密铸造;数值模拟;3D 打印;绿色环保

中图分类号:G642　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)11-1008-05

Modern Investment Casting Technology Development Based on the Integration of Industry and Education and Green Environmental Protection

GE Yinghua[1], YANG Chunfan[2], WANG Weichun[3]

(1. Ningbo Development Zone Andrew Precision Casting Co. LTD, Ningbo 315803, China; 2. Zhejiang Foundry Industry Association, Hangzhou 310009, China; 3. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: Relying on the support of Zhejiang Casting Industry Association and the construction of the industry-education integration base, we promote the application of numerical simulation, 3D printing and other new technologies in the field of investment casting, effectively shorten the product development cycle and improve process reliability. In the process of enterprise development, we also pay attention to the concept of energy saving, emission reduction and green environmental protection to overcome the shortcomings of traditional precision casting. The application prospect of artificial intelligence and information management technology in the field of investment casting is also prospected.

Key words: precision casting; numerical simulation; 3D printing; green environmental protection

铸造作为历史悠久、适应性广泛的金属材料成型工艺,在人类的发展历史上留下了大量的文明瑰宝,而采用熔模精密铸造工艺生产的艺术品则是这些瑰宝中的明珠。熔模精密铸造工艺的基本过程首先是制造与铸型相对应的可熔模样(传统上采用蜡模),然后在可熔模样的表层涂抹数层耐火材料;在耐火材料干燥并且硬化后,通过加热方式将可熔模样熔化去除,得到与铸件模样形状相对应的空腔;然后再对空腔型壳进行烘烤加热,待空腔型壳达到金属液的浇注条件后,将液态金属浇入空腔型壳中,待金属液凝固冷却后去除型壳,从而获得铸件[1]。对比砂型铸造工艺,熔模精密铸造具有铸件表面质量优、尺寸精度高、原材料利用率高、生产应用范围广等优点[2]。因此,熔模精密铸造工艺被广泛应用于航空航天、军事、电子、能源化工、医疗、交通等现代工业领域,为各类高端装备提供关键零部件,代表了现代铸造业的发展方向之一[3]。但是,传统的熔模精密铸造存在工艺流程复杂、生产周期较长、生产过程及废弃物会产生污染等不足。

宁波开发区安德鲁精铸有限公司是中美合资的现代精密铸造企业,在浙江省铸造行业协会的支持推动下,依托浙江机电职业技术学院的智能铸造产教融合基地,推动数值模拟、3D 打印等新技术在精密铸造生产领域的应用,同时注重节能减排、绿色环保的发展理念,取得了较好效果。

1　数值模拟技术的应用

采用计算机数值模拟技术对液态金属的充型和凝固进行仿真模拟,对铸件成型过程开展数字化跟踪分析和缺陷预测,并通过优化的工艺方案和工艺参数来指导实际生产。这对于缩短产品开发周期,提高工艺设计质量,降低产品研制费用等方面具有积极意义;同时也对传统铸造工艺以反复试错、经验积

收稿日期:2021-10-11

作者简介:葛盈华(1981—),浙江绍兴人,工程师.主要从事熔模精铸企业的生产管理、技术提升和战略规划方面的工作.电话:13967888380,
Email:apccast@apccast.com

累为主的设计开发理念提出了挑战。数值模拟技术的推广应用，是传统铸造行业适应数字化发展时代的里程碑式进步[4]。

目前，数值模拟技术在国内铸造行业的应用已趋普遍，铸造仿真模拟软件的开发也层出不穷，应用比较广泛的包括国产的华铸 CAE，Anycasting（合资），进口的 ProCAST、MAGMA 等软件。以咖啡机零部件的开发生产为例，作者单位与浙江机电职业技术学院合作，采用华铸 CAE 对新产品的工艺研发开展了数值模拟及工艺优化，有效节省了研发时间，保证了研发产品的成功率和研发质量。

1.1　咖啡机零件的数值模拟

图 1 为咖啡机零件的三维图，材质 304 不锈钢。304 不锈钢通常也标示为 06Cr19Ni10 或者 SUS304。304 是一种通用性不锈钢，广泛用于制作要求良好综合性能（耐腐蚀和成型性）的设备和机件。咖啡机零件的结构特点为简约不简单、壁厚较薄、不易补缩，而且对于铸件壁厚和表面质量的要求很高，壁厚必须均匀，表面不得有任何形式的缺陷存在。

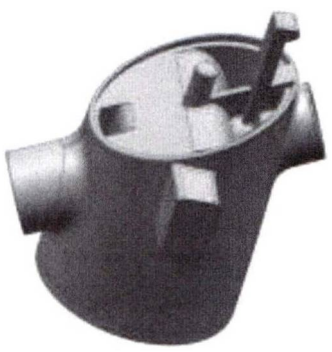

图 1　咖啡机零件三维图
Fig.1　3D picture of coffee machine part

研发团队根据产品结构特点和工艺要求，设计的初步工艺方案如图 2。

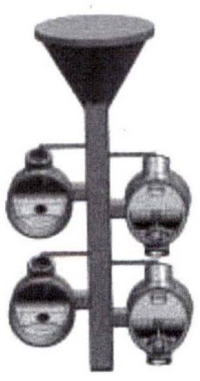

图 2　初步工艺方案
Fig.2　Preliminary process scheme

采用华铸 CAE 对初步工艺方案进行充型和凝固模拟，得到的充型结果如图 3。图 4 是凝固模拟后

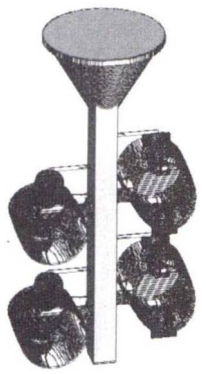

图 3　初步工艺方案充型模拟
Fig.3　Mold filling simulation of preliminary process scheme

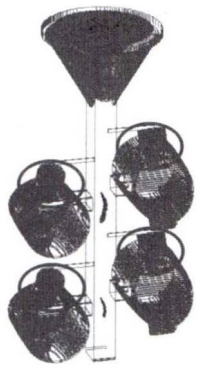

图 4　初步方案缩松缩孔分布
Fig.4　Distribution of shrinkage cavity in preliminary scheme

期铸件的缩松缩孔缺陷分布状况。可以看到，初步工艺方案的充型状况很不理想，且在凝固后期铸件本体部位存在较为明显的缩松缩孔缺陷（图 4 中圆圈处所示）。这种状况的发生，一方面跟初步工艺方案的组树结构（浇注系统）不合理有关，阻碍了钢水的顺畅流动。另一方面，熔模铸造的浇注-冷却是一个复杂的充型-凝固过程，伴随着高温钢液从液体到固体的相变，存在着复杂的物理-化学反应。在充型阶段往往存在气体和氧化杂质，在凝固阶段型壳与周围环境热交换的不稳定容易导致钢液补缩不良，产生缩松缩孔等缺陷[5]。因此需要通过改进组树结构等工艺优化措施来避免缺陷、提高质量。

1.2　咖啡机零件的工艺优化

针对初步工艺方案的仿真模拟结果分析，研发团队开展了充分的工艺论证和方案优化，主要包括两个方面：一方面是蜡树结构的改进，如图 5；另一

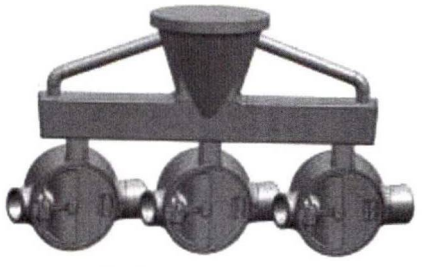

图 5　“蜡树”结构改进
Fig.5　Wax pattern tree structure improvement

方面是在铸件外侧工艺凸起边上增加一块补贴(加强筋),以加强凝固补缩,防止局部缩松缩孔缺陷,如图 6。

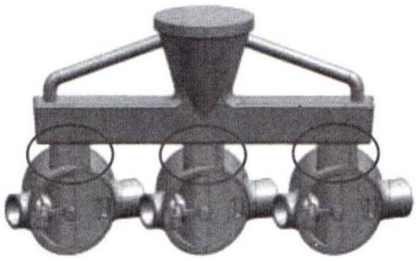

图 6 铸件结构改进
Fig.6 Structural improvement of casting

对完成二次优化的工艺再次采用华铸 CAE 开展仿真模拟验证。可以看到,改进后的工艺方案金属液充型平稳、完全(如图 7)。铸件凝固后期的缩松缩孔已经移到了浇道位置(图 8 中圆圈处所示),铸件整体完整、致密,无明显缩松缩孔缺陷。

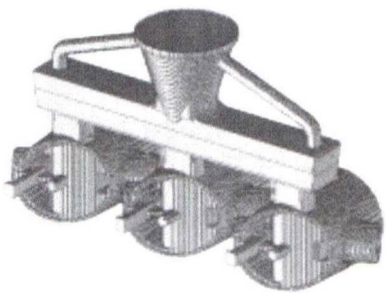

图 7 最终工艺方案充型模拟
Fig.7 Mold filling simulation of final process scheme

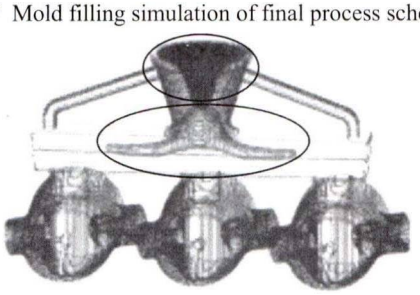

图 8 最终方案缩松缩孔分布
Fig.8 Distribution of shrinkage cavity in final scheme

由此,研发团队通过数值模拟,快速获得了较为理想的新产品铸造工艺方案。下一步,将再次依托校企合作,借助 3D 打印技术,将此铸造工艺方案快速转化为产品组树蜡模,并进一步通过制壳、焙烧、浇注等工艺环节,验证新产品的工艺可靠性和设计质量。

2 3D 打印技术的应用

2.1 智能铸造产教融合基地

高等院校向来是先进技术的引领者和推动者。作为浙江省历史最久、底蕴深厚的热加工专业,浙江机电职业技术学院的铸造专业为浙江省铸造行业培养了大批专业技术和管理人才。如今乘着学校“双高建设”的东风,依托浙江省铸造行业协会的支持,建设完成了智能铸造产教融合基地,旨在帮助和推动浙江省铸造企业转型升级。作者单位有幸入围合作企业。

智能铸造产教融合基地的核心是铸造 3D 打印中心。该中心配备全系列工业级 3D 打印设备,重点是喷墨砂型 3D 打印机(共享集团 Lead-1800 型,如图 9)和激光烧结 3D 打印机(喜马拉雅公司 HIM-P1000 型,如图 10)。

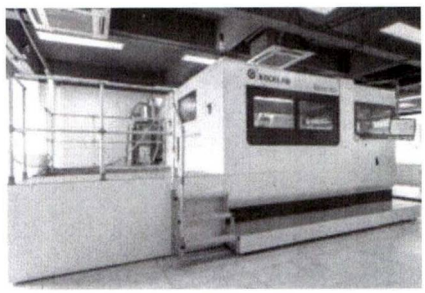

图 9 工业级喷墨砂型 3D 打印机
Fig.9 Industrial grade ink-jet sand 3D printer

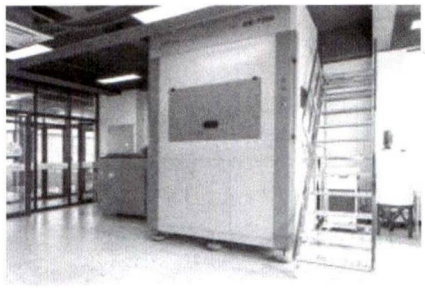

图 10 工业级激光烧结 3D 打印机
Fig.10 Industrial grade laser sintering powder 3D printer

2.2 3D 打印技术在精铸领域的应用

3D 打印技术,也称快速成型技术或者增材制造技术,是一种区别于传统制造工艺的先进制造技术,目前主流的 3D 打印技术包括:光固化成型技术(简称 SLA)、选择性激光烧结技术(简称 SLS)、熔融沉积快速成型技术(简称 FDM)、三维打印成型技术(简称 3DP)、薄材叠层制造技术(简称 LOM)等,它们各具特点,应用在不同的制造领域[6]。

3D 打印技术在熔模精密铸造领域的应用,主要是 SLS、FDM 和 SLA 3 种技术,它们的成型原理、成型材料及应用范围各不相同,但都能大幅缩短产品的研发周期,满足个性化小批量产品的快速生产[7]。作者单位与浙江机电职业技术学院合作,采用选择性激光烧结技术,在咖啡机零件新产品的研制过程中开展了有益尝试。

2.3 3D 打印技术在精铸产品研发中的实践

将上述完成数值模拟和工艺优化的咖啡机零件铸造工艺方案通过软件转换为.stl 格式,输入工业级

激光烧结3D打印机的控制电脑，即可进行模组的打印。选择性激光烧结技术通常采用聚苯乙烯树脂粉末或者覆膜砂作为成型材料，前者具有烧结温度低、变形小、性能优良，价格低廉等优点[8]，是熔模精铸产品的主要打印材料。选择性激光烧结技术的能量源是激光束，其成型原理是先在打印平台上均匀地铺上一层粉末，激光束按照软件生成的分层轮廓和打印路径在指定区域进行扫描和熔融粉末，粉末经过激光束的扫描和熔融会发生烧结反应，从而形成一层烧结层。重复上述步骤逐层烧结，最终打印出整个产品“蜡树”[9]。

完成打印的产品“蜡树”如图11所示。由于3D打印采用的是聚苯乙烯树脂粉末材料，故完成打印后，还需要开展进一步的浸蜡、烘干后得到蜡模，再经过蜕蜡、制壳、焙烧等工序，最后进行浇注、清理和打磨，得到试制完成的新产品(如图12)。

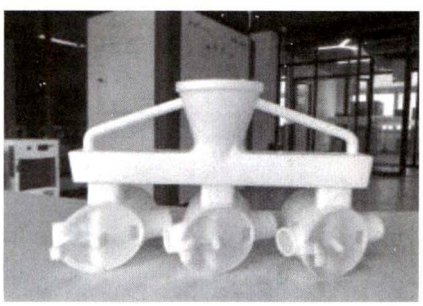

图11 激光烧结3D打印的产品“蜡树”
Fig.11 Laser sintering 3D printed product “wax tree”

图12 咖啡机零件试制产品
Fig.12 Trial-produced coffee machine part

综上所述，借助产教融合将数值模拟和3D打印技术应用到熔模精密铸造的新产品研发，可以有效缩短研发周期、省去试制模具的制作和反复修改工艺的时间及费用。

3 绿色环保的发展理念

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出，以及蓝天保卫战、《铸造工业大气污染物排放限值》、《铸造企业规范条件》等一系列国家法规、行业标准的发布实施，中国铸造行业迎来了转型升级、绿色环保的良性快速发展阶段[10]。作为一家现代精铸企业，作者单位向来重视社会责任与企业担当。绿色环保、节能减排的发展理念也一直伴随着企业的发展壮大。具体体现在原辅材料、设备改造、工艺优化等几个方面。

(1)采用环保型原辅材料　如环保型低温蜡、新型涂料、莫来石粉、环保型耐火材料等。

(2)采用环境友好型工艺　在业内率先采用硅溶胶制壳工艺，消除了传统水玻璃工艺的钠盐和氯化铵等污染。

(3)制壳工艺改进　采用蒸汽脱蜡工艺，完善蜡处理技术，降低废水污染。通过采用快干、强化添加剂以及型壳减薄技术攻关[11]，实现制壳快干和型壳薄壁高强，减少原材料及能源消耗，减少二氧化碳等的排放。

(4)重点设备改造　优化焙烧炉的温度分区控制，充分利用热量，有效降低能源消耗；提高焙烧炉的通过能力和同等能量下的投入产出比。采用回转式悬链干燥线快速循环，加强型壳干燥效果，提高生产效率。熔炼区域改造升级，多方位节能降耗，减少废气排放。

(5)多维度环保创新　将电炉和脱蜡蒸汽的余热集中回收，循环用于空调及生活用水，节能降耗；对打磨及抛丸设备进行改造，集中回收粉尘，降低噪音污染，保护生产环境，呵护员工健康。

(6)工艺优化，持续改进　通过组树优化等手段，提高工艺出品率及产品质量[12]，降低熔炼能耗，减少原材料消耗。

4 结语及展望

通过产教融合、数字赋能、数值模拟以及3D打印等新技术的应用，可以大幅改善熔模精密铸造生产工艺复杂、生产周期冗长的缺点。注重节能减排、绿色环保的发展理念，注定让精铸企业的发展更具担当和活力。相信随着人工智能、大数据和云计算在工业领域的推广应用，传统的铸造行业，包括精铸企业一定会发生更大的，甚至是翻天覆地的变革和发展。

(1)人工智能的普及应用　正如人类从直立行走发展到使用工具，再到人工智能在现代生产、生活各个领域的广泛应用，工业机器人和各类智能装备在铸造行业的推广应用也是历史的必然。国内精铸企业目前应用较为广泛的是各类自动打磨设备。相信随着人工智能技术的进一步发展，从工艺制定、蜡模压制、模组制备、模壳制备、脱蜡、型壳焙烧、熔炼浇注、打磨清理的一系列工艺流程上的工作岗位，都会最大程度地被以工业机器人为代表的人工智能

装备及自动化生产线所代替。

(2)柔性化生产和信息化管理　个性化订单和柔性化生产会成为未来工厂的发展趋势,精铸企业也不例外。利用三维扫描仪、先进设计及仿真软件以及3D打印设备,可以快捷准确地满足各类客户的个性化订单。

MES或者ERP系统可以帮助精铸企业实现从订单下达、工艺设计、原材料准备,生产过程到产品检验的全过程和全域控制。信息化时代的来临,一定会帮助精铸企业更好地实现产品的柔性化生产和全面质量管理。

参考文献:

[1] 吕宇阳,吕存昌,赵凯,等.熔模铸件的缩孔及表面毛刺缺陷防治方法[J].特种铸造及有色合金,2020,40(7):767-769.

[2] 姜不居.熔模精密铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.

[3] 黄佐金.石墨型铸造与熔模铸造BT20钛合金组织与力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[4] 金柱,陈娟.3D打印和ProCAST技术在快速样件上的应用[J].铸造工程,2021(1):37-42.

[5] 白瑀,张浩,黄亮.基于ProCAST的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优[J].热加工工艺,2021(11):71-75.

[6] 王延庆,沈竞兴,吴海全.3D打印材料应用和研究现状[J].航空材料学报,2016,36(4):89-98.

[7] 张敏华.快速铸造技术的研究与发展[J].铸造技术,2009,30(2):292-294.

[8] 杨来侠,刘旭.PS粉的选择性激光烧结成型工艺实验[J].塑料,2016,45(1):100-103.

[9] 吴琼,陈惠,巫静,等.选择性激光烧结用原材料的研究进展[J].材料导报:纳米与新材料专辑,2015(2):78-83.

[10] 柳建国,张耘.我国水玻璃精铸工艺转型升级与实践[C]// 第十六届中国铸造协会年会论文集:2020:278-283.

[11] 邢小颖,汤彬,马运.3D打印技术在石膏型精密铸造中的应用及工艺分析[J].铸造技术,2018,39(10):2282-2284.

[12] 张晓光,韦洲,杨雪.铸钢支架熔模铸造工艺优化[J].铸造技术,2018,39(5):1039-1041.

《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动,旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式,深度挖掘铸造界人文财富,倾心打造行业精深资讯,进而从独有的精神与文化之角度施力,推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于"榜样的力量是无穷的"以及"益言可以兴邦"的基本理念和初衷,《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈,从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事,在第一时间得到启迪与感悟,进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信"唯有真情可以感人"。能感动人的专访报道,必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受,高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处,无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入,是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛,激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染,使人情不自禁地用看似清淡的笔墨,仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对"说理"情有独钟。信奉"唯有讲理可以服人"。因"至"即无限趋近高端,故"至理"系高度符合科学规律的道理。"科学"乃说理的学问,科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶,科学是全人类的共同财富,科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年,读者不难发现,所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是,以优秀传统文化底蕴为基石,以高尚道德操守与精神境界为标杆,倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格,倾心为读者朋友打造理性思考的空间,竭力实现被访者—读者的理性与情感的惊人共鸣。